

Ottavio Serra *
Per il centenario della Relatività
(1905 – 2005)

Come è cambiata la concezione del tempo con Einstein.

Introduzione.

Per capire come Einstein cambiò il modo di concepire il tempo in fisica, è necessario farsi un'idea, almeno a grandi linee, delle concezioni del tempo prima di Lui.

Aristotele, nel IV libro della Fisica (Fisica, IV, 10, 218 a) dice: "...si potrebbe sostenere che il tempo non esiste, dato che è composto di passato e di futuro, di cui il primo non esiste più e l'altro non esiste ancora". Ma subito dopo respinge questa opinione, sostenendo la tesi che il tempo è la misura del movimento (*il tempo è moto che ammette una numerazione*). Si chiede anche se il tempo potrebbe esistere senza l'anima (un essere cosciente), dato che non ci sarebbe nulla da contare se non c'è nessuno che conta. C'è sempre stato il movimento e sempre vi sarà, perché non ci può essere tempo senza il movimento e tutti ammettono che il tempo sia increato. Ma senza materia non c'è moto, perciò tempo, moto, materia (e spazio) sono eterni.

Anticipando ciò che dirò in seguito, si noti come la concezione del tempo e dello spazio in Aristotele richiami in certo modo quella che sarà l'impostazione dello spazio – tempo della teoria della relatività.

La concezione aristotelica del tempo non poté essere accettata dai pensatori cristiani, perché contraria al dogma della creazione di tutte le cose. Tuttavia Origene (Alessandria 185, Tiro 254) riteneva che il mondo, anche se creato da Dio, fosse eterno, non potendo ammettere un mutamento nella volontà divina.

Agostino (Tagaste 354, Ippona 430) nelle Confessioni (Titolo XI) si chiede: "*che cosa faceva Dio prima di creare il mondo?*". Dapprima si schermisce, dicendo che se nessuno gli chiede che cos'è il tempo, egli lo sa, ma se gli si chiede, non sa rispondere. Poi osserva che Dio è eterno ed è il creatore non solo di ciò che è nel tempo, ma anche del tempo, perciò non ha senso chiedersi che cosa facesse Dio *prima* di creare il tempo. Agostino dice poi che il tempo esiste solo come dimensione dell'anima umana. Noi conserviamo la memoria del passato e siamo in attesa del futuro; c'è poi l'attenzione per le cose presenti. La vita dell'uomo si svolge, si distende, tra attenzione, memoria e attesa. (Il tempo è *distensio animae*). Pertanto, le tre scansioni temporali, dovrebbero piuttosto definirsi: presente del passato, presente del presente, presente del futuro.

Se facciamo attenzione, il concetto di tempo in Agostino è di natura psicologica, a differenza della dimensione fisica che aveva in Aristotele, anche se non manca nello Stagirita un nesso tra le due dimensioni.

Newton e Leibniz.

Newton (Woolsthorpe, Lincolnshire, 1642, Londra 1727) codifica i concetti di tempo e di spazio che erano implicitamente presenti nel pensiero di Galilei, e li rende indipendenti dai corpi e dal moto. Essi sono concepiti come dei contenitori di estensione infinita, scenari del dramma cosmico, esistenti per se stessi.

"*Non definisco spazio e tempo, perché notissimi a tutti*", afferma con nostro disappunto Newton, poi dà le famose distinzioni: "Lo spazio assoluto, vero e matematico esiste per se stesso e in esso avviene il moto assoluto dei corpi; lo spazio relativo è costituito dai luoghi che occupano i corpi e di esso si dà misura rispetto ai corpi in esso contenuti."

Analogamente, "il tempo assoluto, vero e matematico scorre ugualmente e indipendentemente dai corpi e dal moto; ma noi abbiamo percezione del tempo relativo ai corpi e al loro mutamento di luogo."

Chiaramente, lo spazio e il tempo assoluti sono una costruzione metafisica che non è suscettibile di evidenza sperimentale e che mai interviene nell'edificazione della meccanica e della gravitazione.

Sia il vescovo Berkeley (Dysert, Irlanda, 1685, Oxford 1753), sia Leibniz (Lipsia 1626, Hannover 1716) criticarono i concetti di spazio e tempo assoluti. Per Leibniz lo spazio e il tempo sono rela-

zioni tra le cose e non esistono fuori e senza di esse. Lo spazio è l'ordine delle cose coesistenti, il tempo è l'ordine degli accadimenti. Ma i successi trionfali della meccanica di Newton furono tali da mettere a tacere tutte le critiche. Particolarmente indigesta era l'idea che azione e reazione si tramettessero a distanza istantaneamente. Lo stesso Newton era consapevole della difficoltà di giustificare l'azione a distanza, ma non potendo spiegarla, scrisse la famosa frase: *Hypotheses non fingo*.

Lo spazio e il tempo di Newton furono elaborati e assunti da Kant (Konigsberg 1724, 1804) come forme a priori dell'intuizione sensibile, cioè strumenti del pensiero per organizzare l'esperienza, perciò non esistenti al di fuori di noi, necessari nella loro struttura euclidea, che rispecchia secondo Kant la struttura della mente umana.

Bergson

La riflessione di Henry Bergson (Parigi 1859, 1941) inizia a fine ottocento; la filosofia di questo periodo era orientata in reazione al positivismo.

Punto centrale del suo pensiero è il problema del tempo; da subito si oppone all'idea di tempo fisico-matematico, che si era affermata in campo scientifico, compresa la psicologia sperimentale. Scrive su questi temi "Saggio sui dati immediati della coscienza" (1889) e "Durata e simultaneità" (1922); in quest'ultimo critica apertamente il concetto di tempo della teoria della relatività einsteiniana.

Per Bergson l'idea di tempo *scientifico*, omogeneo e reversibile, quantitativo e calcolabile, che si limita a riprodurre l'idea dello spazio geometrico, deve essere rifiutata poiché totalmente inadeguata alla speculazione filosofica, in quanto ciò che viene misurato non è l'intervallo di tempo in sé, ma solo una porzione di spazio. Questo porta alla conseguenza che *"se tutti i movimenti dell'universo si producessero due o tre volte più rapidamente non ci sarebbe nulla da modificare nelle nostre formule, né nei numeri che vi facciamo entrare"*. In parte questa concezione si avvicina a quanto sostenuto da Poincaré nella sua impostazione convenzionalista dei concetti scientifici.

Bergson arriva ad affermare che *"l'intervallo di durata non conta dal punto di vista della fisica"*; questa (la fisica) riesce a cogliere solo la proiezione della traiettoria spaziale e non il movimento in sé.

Ciò che registra la durata reale è la singola coscienza per la quale il tempo è inesteso e indivisibile, qualitativo ed eterogeneo, non misurabile ed irreversibile.

C'è un'inconciliabile scissione tra il mondo e la sua coscienza, come egli scrive: *"nel nostro io c'è successione senza esteriorità reciproca, fuori dell'io esteriorità reciproca senza successione"*.

La vera durata, però, viene messa in secondo piano ed occultata dalle esigenze dell'azione e della comunicazione sociale; inoltre la comune idea di spazio influenza a nostra insaputa anche la vita interiore; *"proiettiamo il tempo nello spazio [...] e la successione prende per noi la forma di una linea continua"*, mentre solo a tratti riconosciamo la caratteristica peculiare della nostra coscienza: il flusso di coscienza.

Solo in questi momenti possiamo capire la verità su di essa e scoprire che la psicologia sperimentale e associativa è solo un modo per dare un'apparente scientificità alla visione deformata del senso comune.

Per Bergson la psicologia e la filosofia possono divenire rigorose solo riconoscendo che i fatti di coscienza sono qualità pura e non ammettono misurazione, cioè rinunciando all'idea positivista di ridurre la realtà spirituale all'ordine dello spazio e del numero.

La concezione di Bergson, pur esposta in una forma letterariamente pregevole (fu insignito del premio Nobel per la letteratura nel 1927), non ha nessun valore scientifico. Se mi sono dilungato su di lui, è per non essere accusato di voler trascurare il pensiero di un filosofo che ha fatto epoca. Il tempo che interessa la fisica è quello suscettibile di misura, come già aveva capito Aristotele, il tempo di Galilei e Newton prima, di Einstein poi.

Poincaré

Con Poincaré (Nancy 1854, Parigi 1912) ci avviciniamo alla concezione relativistica del tempo. Contrariamente a quanto si pensa comunemente, col grande scienziato ed epistemologo francese il

tempo viene solidamente ancorato ai processi empirici di misurazione delle longitudini che alla fine dell'800 erano diventati di importanza economica cruciale ai fini del commercio e del dominio dei mari. Lo sviluppo dell'industria elettrotecnica e del telegrafo permise di tracciare una mappa dettagliata e sempre più precisa delle longitudini mediante scambio di segnali telegrafici in andata e ritorno tra coppie di località. Dopo una crisi tra Inghilterra e Francia che rischiò di degenerare in conflitto armato, perché l'Inghilterra, con l'appoggio degli Stati Uniti (conferenza internazionale di Washington, 1884) ottenne che il meridiano di Greenwich diventasse il meridiano fondamentale e per conseguenza il tempo di Greenwich tempo universale (TU), il Bureau des Longitudes francese, di cui Poincaré fu a più riprese presidente, e l'equivalente ufficio britannico si accordarono per depositare a Parigi i campioni internazionali di lunghezza e di massa (1889), mentre continuavano le misure di differenze di longitudini mediante scambi di segnali telegrafici.

La misura del tempo era vista da Poincaré sempre più chiaramente come determinazione di simultaneità, in seguito al suo lavoro al Bureau des Longitudes. Egli non pensava inizialmente al nesso tra simultaneità e misura del tempo da una parte ed elettromagnetismo di Maxwell e problemi dell'etere dall'altra.

Un'ingegnosa ma difficile teoria per spiegare il rompicapo dell'etere, come il risultato negativo degli esperimenti di Michelson, Morley e di altri, intesi a misurare il moto della Terra rispetto all'etere, era stata ideata dal grande fisico olandese Lorentz (1853, 1926), nella quale si ammetteva che un corpo in moto nell'etere, sede dei fenomeni elettromagnetici e identificato con lo spazio assoluto di Newton, si contraesse nella direzione del moto. Ciò richiedeva che in ogni sistema di riferimento mobile rispetto all'etere si dovesse introdurre un tempo fittizio, diverso per ciascun sistema di riferimento, in modo che la forma delle equazioni di Maxwell restasse immutata nel passaggio dal riferimento assoluto dell'etere ad un altro sistema di riferimento inerziale. In verità le formule di Lorentz non lasciavano le equazioni di Maxwell rigorosamente invariate, ma solo approssimativamente. Fu Poincaré, guidato dalla teoria matematica dei *gruppi*, a dare alla trasformazione, detta poi da Einstein *trasformazione di Lorentz*, la forma definitiva e a chiamare il tempo fittizio di Lorentz tempo locale, per analogia con il tempo locale e il mezzogiorno locale di cui si parlava nei problemi di determinazione delle longitudini.

Poincaré però non mise mai in dubbio che il tempo vero (e matematico) fosse quello di Newton e fino alla sua prematura morte sostenne la realtà dell'etere.

Einstein

Questi, come Poincaré, ritiene che ogni giudizio sul tempo sia un giudizio di contemporaneità. Anticipando le definizioni operative di Heisenberg¹ in fisica quantistica e le considerazioni generali del fisico ed epistemologo americano Bridgman sul carattere operativo dei concetti², Einstein afferma che tempo e spazio sono ciò che si misura, rispettivamente con orologi e regoli. Dice Einstein nella celebre memoria del giugno 1905³: “Se vogliamo descrivere il moto di un punto materiale [rispetto a un sistema di coordinate], diamo i valori delle coordinate in funzione del tempo. E' ora da tener ben presente che una tale descrizione matematica ha poi un senso fisico solamente quando ci si è dapprima chiarito che cosa viene qui inteso per “tempo”. Noi dobbiamo considerare che tutti i nostri giudizi, nei quali il tempo ha un ruolo, sono sempre giudizi circa *avvenimenti contemporanei*. Se io per es. dico: <quel treno arriva **qui** alle **ore 7**>, ciò equivale circa a: <la sovrapposizione della lancetta del mio orologio sul 7 e l'arrivo del treno sono contemporanei>”.

Ciò basterebbe, continua Einstein, per definire il tempo in prossimità di un dato orologio. Ma se voglio connettere i tempi segnati da orologi distanti nelle posizioni A e B rispettivamente, occorre qualche opportuna convenzione. Egli sceglie la convenzione adottata dai telegrafisti e da Poincaré,

¹ Werner Heisenberg, “I principi fisici della teoria dei quanti”, Verlag-Lipsia 1930, Boringhieri-Torino 1963.

² Percy Bridgman, “La logica della fisica moderna”, MacMillan-New York 1951, Einaudi-Torino 1952.

³ Albert Einstein, “Sull'elettrodinamica dei corpi in moto”, traduzione di Paolo Straneo in “Cinquant'anni di Relatività” a cura di Mario Pantaleo, Edizioni Giunti – Sansoni, Firenze 1955.

senza però nominarlo: se da A mando un segnale elettromagnetico al tempo $t(A)$ verso B e il segnale arriva in B al tempo $t(B)$ e ritorna in A al tempo $t'(A)$, si conviene che

$$[1] \quad t(B) - t(A) = t'(A) - t(B).$$

Quando questa uguaglianza si verifica, gli orologi in A e in B sono sincroni per definizione. Come si nota, in questa definizione è sottinteso che la luce (il segnale radio, in generale elettromagnetico), si propaga nel vuoto con uguale velocità nei due sensi. Se B è sostituito da uno specchio, la velocità della luce, che viene assunta come costante universale, è data dal doppio della distanza AB divisa per l'intervallo di tempo $t'(A) - t(A)$.

Veramente, per la determinazione della longitudine non si usava l'uguaglianza [1], perché il significato dei termini era diverso. B, supposto ad Est di A, mandava ad A un segnale telegrafico, (in seguito un segnale radio), al suo mezzogiorno locale ($t(B)$ =ore 12 di B). A lo riceveva all'istante $t(A)$ del suo orologio locale, ma $t(A)-t(B)$ non era la differenza di longitudine corretta, a causa della velocità finita del segnale. Per esempio, se A è a 15° a ovest di B, cioè un'ora di longitudine ovest, e il segnale impiega 5 minuti (**si fa per dire!**), A riceve il segnale non alle ore 11, bensì alle 11:05, perciò $t(AB)=t(A)-t(B) = -00:55$.

Poi A invia a B un segnale orario alle ore $t'(A)=12$, ora locale di A, e B lo riceve alle ore $t'(B)=13:05$ del suo tempo locale. Perciò $t(BA)=t'(B)-t'(A) = +01:05$. (Si suppone che A e B si siano accordati in precedenza, oppure facciano precedere i propri segnali orari da un messaggio esplicativo). Allora la semidifferenza dei tempi (con segno!) dà la longitudine di A rispetto a B e la semisomma dà la velocità del segnale. (In realtà, dà la distanza AB in minuti-luce).

Anche Einstein, come Poincaré, dà una grande importanza alle determinazioni di simultaneità e non a caso, se si pensa che il francese è stato per anni impegnato nel Bureau des Longitudes, Einstein all'Ufficio Brevetti di Berna, capitale della Svizzera e patria degli orologi.⁴

Ma ora dobbiamo capire perché viene assegnato un particolare privilegio alla velocità della luce, e che c'entra, con la cinematica, l'elettrodinamica dei corpi in movimento.

Nella teoria elettromagnetica di Maxwell, resa più accessibile alla mentalità degli scienziati europei dalle opere e dagli esperimenti di Hertz, le onde elettromagnetiche, in particolare la luce, viaggiano nel vuoto a una velocità c legata alla costante dielettrica ϵ e alla permeabilità magnetica μ dalla formula

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

e non si evince alcuna dipendenza di questa velocità dallo stato di moto di un particolare sistema di riferimento. Per analogia con le onde meccaniche e acustiche, che si propagano in un mezzo materiale elastico, fu immaginato un mezzo speciale, l'etere, che pervade tutto l'universo; la luce sarebbe una vibrazione dell'etere. Ma siccome la luce e in generale ogni onda elettromagnetica consiste in vibrazioni trasversali, l'etere, per analogia con i mezzi materiali che devono essere rigidi per poter trasmettere onde trasversali, dovrebbe essere immaginato non fluido, ma solido e dotato di una rigidità immensa, data l'alta velocità della luce. Questo rende molto difficile immaginare come l'etere non ostacoli in alcun modo il moto dei pianeti.

D'altra parte, mentre le leggi della meccanica di Newton obbedivano a un principio di relatività, quella galileiana, le leggi dell'elettrodinamica non obbedivano a un principio di relatività, erano più semplici nel sistema di riferimento dell'etere o, se vogliamo, dello spazio assoluto di Newton.

Tutti i tentativi di mettere in evidenza il moto della Terra e in seguito del Sole rispetto all'etere, fallirono. Le ***cose andavano come se la velocità della luce non si sommasse con quella della sorgente.***

Torniamo un attimo alla meccanica. In essa vale il teorema del parallelogrammo di Galileo per la composizione delle velocità, conseguenza immediata del principio di relatività galileiana: *tutti i fenomeni meccanici avvengono allo stesso modo in due riferimenti in moto reciproco rettilineo uni-*

⁴ Peter Galison, "Gli orologi di Einstein, le mappe di Poincaré", Cortina Editore Milano 2004.

forme. Da qui segue la trasformazione di Galilei: $x' = x - vt$, $y' = y$, $z' = z$, essendo v la velocità del riferimento accentato rispetto al riferimento non accentato. L'inversa è $x = x' + vt$, $y = y'$, $z = z'$.

A rigore dovrebbe aversi $x = x' + vt'$, ma per Galilei è ovvio che sia $t' = t$ (il tempo è assoluto).

Se consideriamo velocità parallele e concordi, le velocità si sommano semplicemente. Se la velocità di un treno è di 30 metri al secondo e un passeggero nel corridoio fa 2 metri al secondo, il passeggero avanza rispetto al terreno di 32 metri al secondo. Immaginando una catena di sistemi di riferimento inerziali, cioè che si muovano uno rispetto all'altro di moto rettilineo uniforme, si può fare in modo che un corpo abbia rispetto a uno di questi riferimenti una velocità grande a piacere, una velocità tendente all'infinito. Una velocità infinita non si sommerebbe con la velocità di un sistema di riferimento.

Ma una velocità infinita è semplicemente fantastica. E' più realistico pensare che ci sia un tetto finito, un massimo, per le velocità degli agenti fisici in natura. Questo tetto non si potrebbe sommare con la velocità della sorgente, altrimenti non sarebbe il tetto. Siccome in un insieme numerico il massimo, se esiste, è unico, questo massimo va identificato con la velocità che non si somma con quella della sorgente, e questo è il caso della velocità della luce. Lo sviluppo della teoria della relatività mostrerà poi che la velocità limite della luce è raggiunta da tutte le particelle aventi massa (di quiete) uguale a zero.

Ritorniamo adesso al problema della sincronizzazione degli orologi, quando si passa da un riferimento inerziale a un altro in moto con velocità v rispetto al primo, per esempio un treno in corsa rispetto alla massicciata ferroviaria. Eventi simultanei rispetto alla massicciata sono simultanei rispetto al treno?

Siano A e B due punti sulla massicciata distanti quanto la lunghezza del treno A'B', M il loro punto medio. Se in A e in B si accendono due segnali luminosi quando A' transita per A e B' per B e i due lampi sono percepiti simultaneamente in M, allora i due segnali sono simultanei nel riferimento della massicciata. Ben diversamente vanno le cose nel treno. Sia M' il punto del treno corrispondente ad M quando partono i segnali luminosi da A=A' e da B=B'. I lampi sarebbero giudicati simultanei se la luce giungesse nello stesso istante in M'. Se la velocità della luce fosse infinita, questo sarebbe il caso. Ma, tenendo conto della velocità finita della luce, mentre questa va da A e da B verso M, il treno avanza verso B, perciò M' registra la luce di B prima della luce di A. I due eventi sul treno non sono simultanei. Il tempo scorre diversamente in riferimenti inerziali in moto reciproco.

Questo risultato fortemente contro-intuitivo lasciò perplessi per molto tempo i fisici della generazione di Lorentz e di Poincaré. Il fatto è che le velocità usuali nella vita quotidiana e anche nella fisica macroscopica sono estremamente piccole rispetto alla velocità della luce, per cui nel caso del treno, ma anche dei missili, lo scarto dalla simultaneità è così piccolo che non si può apprezzare, non dico ad occhio ma neanche con orologi sofisticati. E' questo il motivo per cui, quando vediamo un lampo, giudichiamo il fulmine contemporaneo al lampo, mentre se udiamo il tuono, facciamo stime correttive. Per lo stesso motivo, se vediamo un orologio su un campanile anche lontano, regoliamo il nostro orologio sul campanile e non ci sogniamo di posticipare la regolazione, ma se l'informazione dell'ora ci è comunicata da una staffetta, perché noi non vediamo il campanile, ci pensiamo due volte prima di regolare il nostro orologio in base a quella informazione.

In astronomia, date le enormi distanze, la cosa è diversa. La famosa super nova che brillò nel 1987 nella Grande Nube di Magellano non la datiamo 1987, ma 160 mila anni prima, perché quella galassia dista da noi 160 mila anni luce. Naturalmente questa è cosa ovvia e, anche se connessa alla relatività del tempo, non è direttamente in essa che consiste la relatività del tempo.

Se la luce fosse infinitamente veloce, la simultaneità sarebbe assoluta, il tempo scorrerebbe ugualmente per tutti gli osservatori inerziali, spazio e tempo sarebbero indipendenti l'uno dall'altro, vedremmo in un medesimo istante *ciò che per l'universo si squaderna*.⁵

Per Bergson (*"Durata e simultaneità"* 1922) la simultaneità è assoluta e il risultato ottenuto da Einstein è solo apparente. Dice il filosofo francese: *Le formule di Lorentz dicono semplicemente quali*

⁵ Dante, Paradiso, XXXIII 87.

dovrebbero essere le misurazioni attribuite ad S' sul treno affinché il fisico S sulla massicciata veda il fisico da lui immaginato in S' trovare la stessa velocità della luce che ha trovato lui.

Bergson non vuole accettare il fatto che il fisico S' non è soltanto *immaginato* da S, è un fisico con gli stessi diritti di S: le loro misure di tempo possono essere registrate e poi confrontate. Il confronto obiettivo dà ragione ad Einstein: le durate sono quelle previste dalla relatività.

Per conseguenza spazio tempo e moto sono indissolubilmente legati. Come disse Minkowski, uno dei professori di Einstein a Zurigo, in una conferenza del 1908, spazio e tempo non hanno più un'esistenza indipendente, sono delle pure ombre, ciò che ha realtà fisica è la loro combinazione spazio-tempo, per il tramite della velocità limite della luce.

E' chiaro che nel 1905, e neanche nel 1922 al tempo della polemica di Bergson, la relatività del tempo non poteva essere sperimentalmente verificata. Valga a tal proposito il ragionamento seguente.

Mentre la relatività di localizzazione spaziale l'accettiamo agevolmente, perché rientra nella nostra esperienza quotidiana, la relatività di localizzazione temporale ci sembra paradossale. Faccio un esempio.

(1°) Si immagini un viaggiatore seduto in uno scompartimento di un treno in corsa, poniamo a 30 metri al secondo, che fa una telefonata di un minuto. Nel *luogo* del treno i due eventi, inizio e fine della telefonata, avvengono nello stesso posto, invece nel *luogo* della massicciata avvengono in posti diversi, per la precisione a 1800 metri di distanza. (Ho calcolato questa distanza senza distinguere la durata della telefonata misurata sul treno, 60 secondi, dalla durata della telefonata misurata sulla massicciata, perché la velocità del treno è estremamente piccola rispetto alla velocità della luce).

(2°) Si immaginino ora due eventi, che accadono agli estremi del corridoio, simultanei nel treno. Essi, a rigore, non sono simultanei rispetto alla massicciata. Fatti i conti, risulta una differenza temporale di circa un centomillesimo di miliardesimo di secondo. (Ho considerato il corridoio lungo 30 metri).

Si capisce allora perché un non scienziato come Bergson consideri la durata un assoluto che può essere colto con un atto intuitivo dello spirito. Per una esposizione degli errori di Bergson in fisica si veda ⁶.

Veramente, anche scienziati molto autorevoli rifiutarono, come Bergson, la relatività della durata⁷. Il fatto è che non è semplice liberarsi dei pregiudizi assorbiti fin dalla fanciullezza. Un'idea rivoluzionaria richiede un grande sforzo per essere assorbita e, come dice il fisico Emilio Segré, diventa naturale e intuitiva solo nella generazione successiva (quando i contemporanei sono morti).

Ai tempi di Einstein non si potevano misurare intervalli di tempo così piccoli, le conferme della teoria erano indirette, essenzialmente di natura dinamica riguardanti particelle sub nucleari, e vennero abbastanza tardi. Paradossalmente, si ebbero prima alcune verifiche della relatività generale. Ma ora, con gli orologi atomici, si ha la possibilità di verifiche dirette anche in veicoli macroscopici, come gli aerei (Hafele e Keating 1971⁸).

Riassumendo, Einstein aveva davanti due difficoltà: 1°) i fenomeni meccanici regolati dalle leggi di Newton obbedivano a un principio di relatività descritto lucidamente da Galilei in un brano famoso del "Dialogo sui due massimi sistemi", mentre le leggi elettrodinamiche di Maxwell non obbedivano al principio di relatività; 2°) la velocità della luce era invariante (restava la stessa) passando da un riferimento inerziale a un altro in moto rettilineo uniforme rispetto al primo.

Il colpo di genio di Einstein consistette nell'assunzione di questi due principi apparentemente contraddittori come fondamento della nuova teoria:

1° Tutti i fenomeni fisici (e non solo quelli meccanici) obbediscono al principio di relatività galileiana; ciò significa che le leggi della fisica, dalla meccanica all'elettromagnetismo, devono restare invariate nel passaggio da un sistema di riferimento inerziale a un altro;

⁶ Alan Sokal e Jean Bricmont, "Imposture intellettuali", Garzanti Milano 1999.

⁷ Augusto Kopff, "I fondamenti della relatività einsteiniana", Appendice, Hoepli, Milano 1923.

⁸ Elio Fabbri, "Per un insegnamento moderno della Relatività", Tipografia Editrice Pisana, Pisa 1989.

2° La velocità della luce è la stessa in tutti i riferimenti inerziali e perciò si comporta come una velocità infinita che nessun corpo può superare.

Dell'apparente contraddizione tra i due principi Einstein aveva già fatto intravedere la soluzione, quando aveva mostrato qualitativamente la relatività della contemporaneità e che di conseguenza la durata di un processo era relativa allo stato di moto del sistema di riferimento.

Sfruttando i due principi, con matematica assolutamente elementare ricava la trasformazione delle coordinate spaziali e temporale, che Egli chiama *trasformazioni* di Lorentz, in onore del fisico olandese. Questa sostituisce la trasformazione di Galilei e da essa segue quantitativamente la *contrazione delle lunghezze e la dilatazione del tempo*, l'inerzia dell'energia, la nuova meccanica.

E'importante notare che se la velocità relativa dei due riferimenti è piccola rispetto a quella della luce, il che equivale a dire che la velocità della luce tende all'infinito, la trasformazione di Lorentz si riduce a quella di Galilei, le velocità si sommano nel modo abituale e il tempo diventa *assoluto*, cioè scorre ugualmente nei due riferimenti, come affermava Newton. In generale la composizione di due velocità parallele (e concordi) è minore della loro somma aritmetica, e se una (o entrambe) uguaglia c (la velocità della luce), la loro composizione fornisce ancora c .

E' appena il caso di sottolineare che le equazioni elettrodinamiche di Maxwell sono invarianti rispetto alla trasformazione di Lorentz; ciò era da aspettarsi, dato che non c'è nulla di più relativistico di un campo elettromagnetico (la luce va alla velocità della luce!). Invece le equazioni dinamiche di Newton, invarianti rispetto alla trasformazione di Galilei, non lo sono rispetto a quella di Lorentz. Pertanto la dinamica relativistica è diversa da quella classica. Per un approccio elementare e per le conseguenze dinamiche, si veda, per esempio, ⁹.

Non posso a questo punto passare sotto silenzio il paradosso dei gemelli, che ha fatto scorrere fiumi di inchiostro.

Ci sono due gemelli, Pietro e Paolo; Pietro resta sulla Terra, Paolo affronta un viaggio interstellare. Quando Paolo torna sulla Terra confronta il suo orologio con quello di Pietro e osserva che il suo orologio è *indietro*, cioè per Paolo il viaggio è durato meno che per il *sedentario* Pietro.

Secondo Bergson, *e non solo per lui*, i due orologi, una volta che Paolo è tornato sulla Terra, devono essere sincroni, perché, proprio per la relatività del moto, si può immaginare Paolo fermo e Pietro in viaggio sull'astronave *Terra*. Perciò, se fosse vera la teoria di Einstein, dovrebbe essere indietro l'orologio di Pietro, cioè ciascun orologio sarebbe indietro rispetto all'altro, ma ciò è contrario al principio di non contraddizione, conclude trionfalmente Bergson, la teoria di Einstein è falsa *per la contraddizione che no'l consente*. ¹⁰

Come al solito, Bergson prende una cantonata; infatti Pietro e Paolo non sono in situazioni simmetriche. Pietro è in un riferimento inerziale (approssimativamente), Paolo no, perché nel suo viaggio deve accelerare rispetto alla Terra tre volte, all'andata, al momento dell'inversione, al ritorno e se accelera in modo troppo violento è lui a rompersi l'osso del collo, non Pietro. Perciò se la durata complessiva del viaggio rispetto all'orologio di Pietro è T , rispetto all'orologio di Paolo è

$T' = T \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < T$, come ora si può verificare quotidianamente negli acceleratori di particelle e nell'ingegneria relativistica, per esempio nella realizzazione del sistema di navigazione satellitare GPS.

Perché la denominazione di *Teoria della Relatività*.

Nella fisica di Newton spazio e tempo erano, separatamente, *assoluti*. Nella fisica relativistica spazio e tempo sono *relativi*. Perciò si giustifica il nome *Relatività*.

Ma a livello più profondo ci sono nuovi *assoluti*. Intanto c'è l'assoluto della velocità della luce. Se assumiamo uguale ad 1 tale velocità, ogni altra velocità è compresa (in modulo) tra 0 ed 1. Ma que-

⁹ Ottavio Serra, "Teoria della Relatività", Annuario N° 16 del Liceo Scientifico "Scorza" anno scolastico 2003/2004, Cosenza 2005.

¹⁰ Dante, "Inferno", canto XXVII verso 120.

sta è solo una semplificazione formale. L'assoluto cinematico più profondo è la separazione spazio – temporale, il cui quadrato è definito come il quadrato dell'intervallo temporale ($c=1$) meno il quadrato della distanza spaziale. Ciò significa che, mentre la distanza spaziale dl tra due eventi cambia passando da un riferimento inerziale a un altro, come pure l'intervallo temporale dt , la separazione spazio – temporale ds permane invariata (è Lorentz – invariante): $dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2) = ds^2 = ds'^2$.

Analogamente, nella dinamica si trova che energia e massa sono uguali: $E = m$ ($E=mc^2$); che l'energia e la quantità di moto sono relativi allo stato di moto del riferimento, ma la differenza dei loro quadrati è assoluta, è il quadrato della massa (di quiete). $E^2 - p^2 = m^2$ [$E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2$].

Nota. Siccome c è una costante universale, basta assumerla uguale ad 1 per evidenziare la sostanziale identità tra spazio e tempo da una parte, massa ed energia dall'altra. Con ciò il numero delle grandezze indipendenti diminuisce, il che accade tutte le volte che si passa da una teoria ad una più profonda e comprensiva. L'identificazione tra grandezze proporzionali è molto naturale per la mente umana; è questo il motivo per cui l'agente fisico responsabile dell'attrazione gravitazionale, che a rigore dovremmo chiamare *carica gravitazionale*, viene chiamato *massa* (gravitazionale) e identificato con la massa, cioè con la grandezza che misura l'inerzia, la *resistenza* che oppone un corpo a cambiare il suo stato di moto. Che massa gravitazionale (carica gravitazionale) e massa fossero proporzionali l'aveva già sperimentato Newton con una precisione dell'un per cento, in seguito Eotvos (Budapest 1848, 1919) con la precisione di un cento-miliardesimo e su questa proporzionalità Einstein edificò la relatività generale (*principio di equivalenza*).

Del resto, anche quando due grandezze sono solo approssimativamente proporzionali, tendiamo a identificarle; per questo motivo, fino a quando non ci allontaniamo troppo dalla superficie della Terra, identifichiamo la massa di un corpo con il (modulo del) peso. Perciò diciamo che *pesiamo* un corpo, quando la bilancia usuale, a due bracci, misura invece la massa. Per questo gli studenti e il mio negoziante, a volte, confondono massa e peso.

Per una trattazione più approfondita di questi argomenti, come pure per un'introduzione alla relatività generale, si veda l'articolo indicato in nota 9 e la bibliografia ivi riportata.

Il tempo nella Relatività generale.

Lo scorrere del tempo non è influenzato solo dallo stato di moto, ma dipende anche dalla concentrazione della materia nelle vicinanze, cioè dal campo gravitazionale.

La Relatività generale ha il suo fondamento empirico nella proporzionalità tra massa (inerte) e carica gravitazionale. Scegliendo opportunamente la costante di proporzionalità, si può fare in modo che le due grandezze siano numericamente uguali. E' per questo che la carica gravitazionale viene chiamata massa (gravitazionale). Una conseguenza è che tutti i corpi cadono con uguale accelerazione in un campo gravitazionale, così come in un riferimento accelerato tutti i corpi hanno la stessa accelerazione (quella del riferimento cambiata di segno). Segue che per la descrizione dei fenomeni un riferimento accelerato si comporta come un riferimento in quiete immerso in un campo di gravitazione.

In particolare, in un campo gravitazionale non vale la geometria euclidea. Basta pensare a una piattaforma circolare ruotante in un riferimento inerziale; rispetto ad esso il bordo subisce la contrazione di Lorentz, mentre il raggio, perpendicolare alla velocità di rotazione del bordo, resta invariato. Perciò il rapporto tra la lunghezza del bordo e il raggio è minore di π (geometria ellittica). Lo scorrere del tempo sul bordo rallenta rispetto al centro (in quiete) della piattaforma. Ma il bordo della piattaforma è immerso in un campo di accelerazione (centrifuga), equivalente a un campo di gravitazione: perciò il tempo scorre tanto più lentamente quanto più intensa è la gravità.

Le conseguenze sono:

- (1) Rallentamento del tempo, che si manifesta come red shift gravitazionale.
- (2) Incurvamento dei raggi luminosi in un campo di gravità.

La luce pertanto si incurva più o meno fortemente secondo l'intensità del campo gravitazionale che attraversa. Il fenomeno è particolarmente intenso se la luce passa vicino a una pulsar o a un buco nero. La luce di un quasar lontano che attraversa un ammasso di galassie è come se passasse attra-

verso una lente (lente gravitazionale); il quasar appare più luminoso e a volte appare sdoppiato in due o più immagini.

Una conseguenza è che lo scorrere del tempo in cima a una torre è più rapido che alla base, dove il campo gravitazionale è più intenso. Naturalmente la differenza è minima nel caso di una torre terrestre, tuttavia fu misurata dai fisici americani Pound e Rebka nel 1962 utilizzando l'effetto Mosbauer in una torre alta 25 metri. Per una trattazione elementare, si veda la bibliografia citata nelle note 8 e 9 e il libro N° 3 della Bibliografia ulteriore riportata in fondo a questo articolo.

(3) Precessione del periastro di un pianeta. (Einstein riporta i calcoli per il perielio di Mercurio, che fra tutti i pianeti del sistema solare, è quello che esibisce l'effetto maggiore, sia perché è il più vicino al Sole e perciò risente un campo gravitazionale più intenso, sia perché l'eccentricità dell'orbita è relativamente grande e rende più evidente il fenomeno).

Nell'enorme campo gravitazionale di una pulsar l'effetto è molto più marcato.

Le tre immagini seguenti illustrano lo spostamento del perielio (in generale, del periastro).

Fig. 1(simulazione di orbita newtoniana: nessuno spostamento)

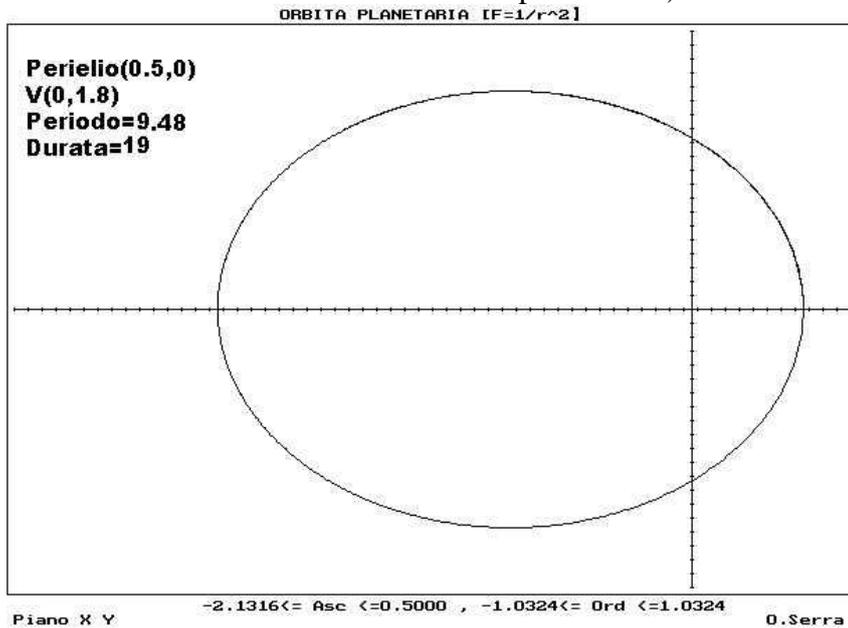
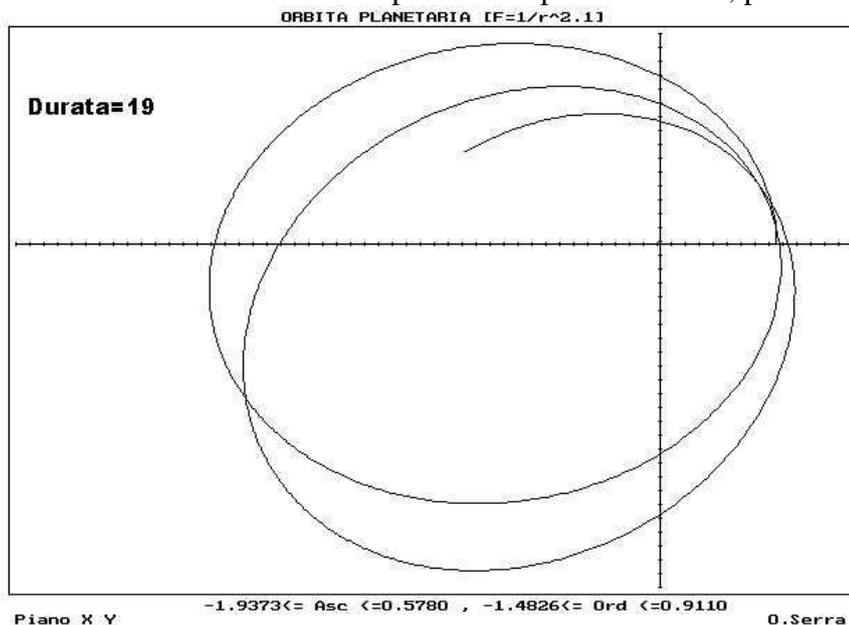
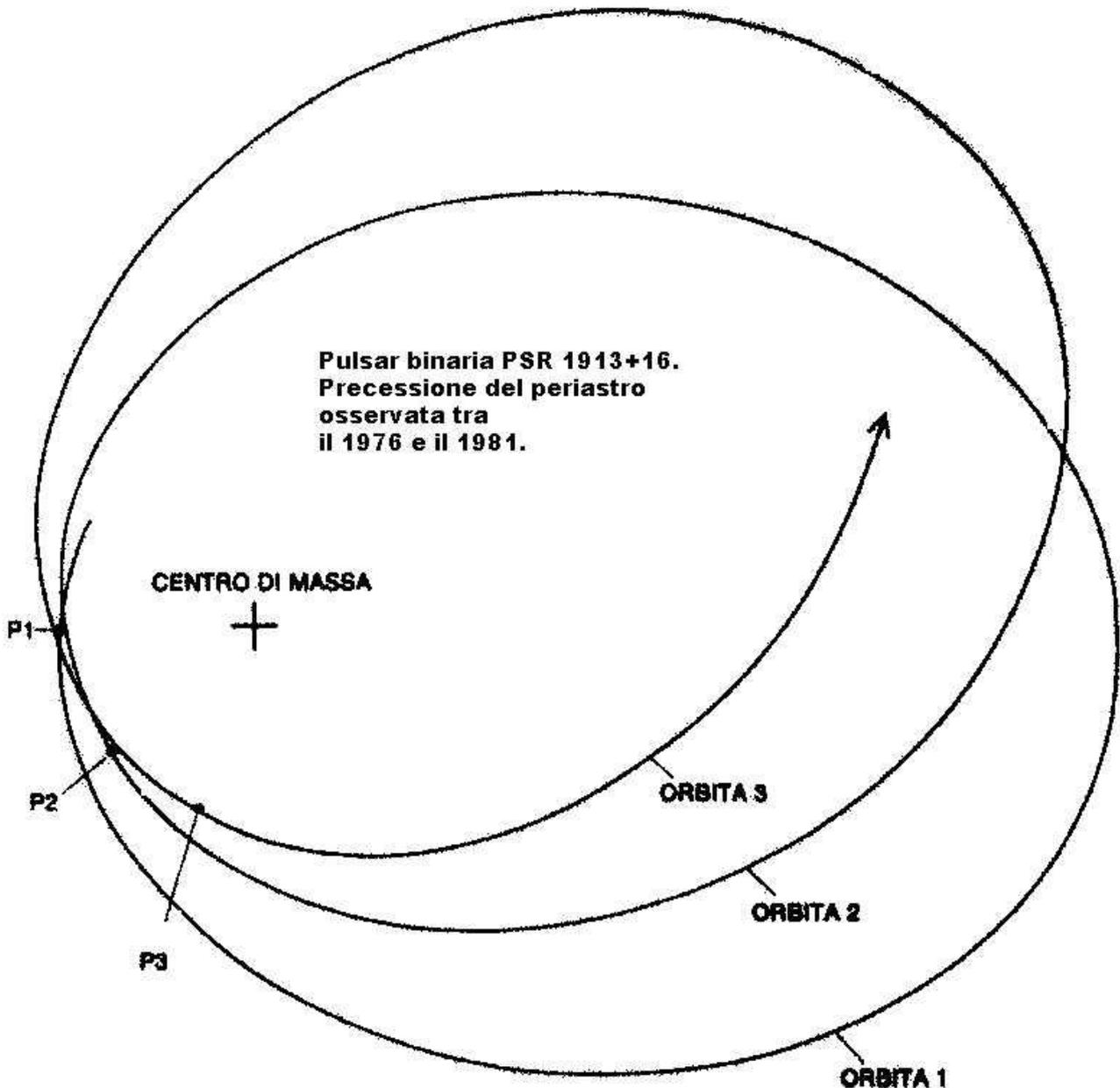


Fig. 2 (simulazione orbita relativistica: il perielio si sposta in avanti, precessione diretta).



Le simulazioni sono state effettuate dall'autore.

Fig. 3 (precessione del periastro di una pulsar binaria osservata dal 1976 al 1981)

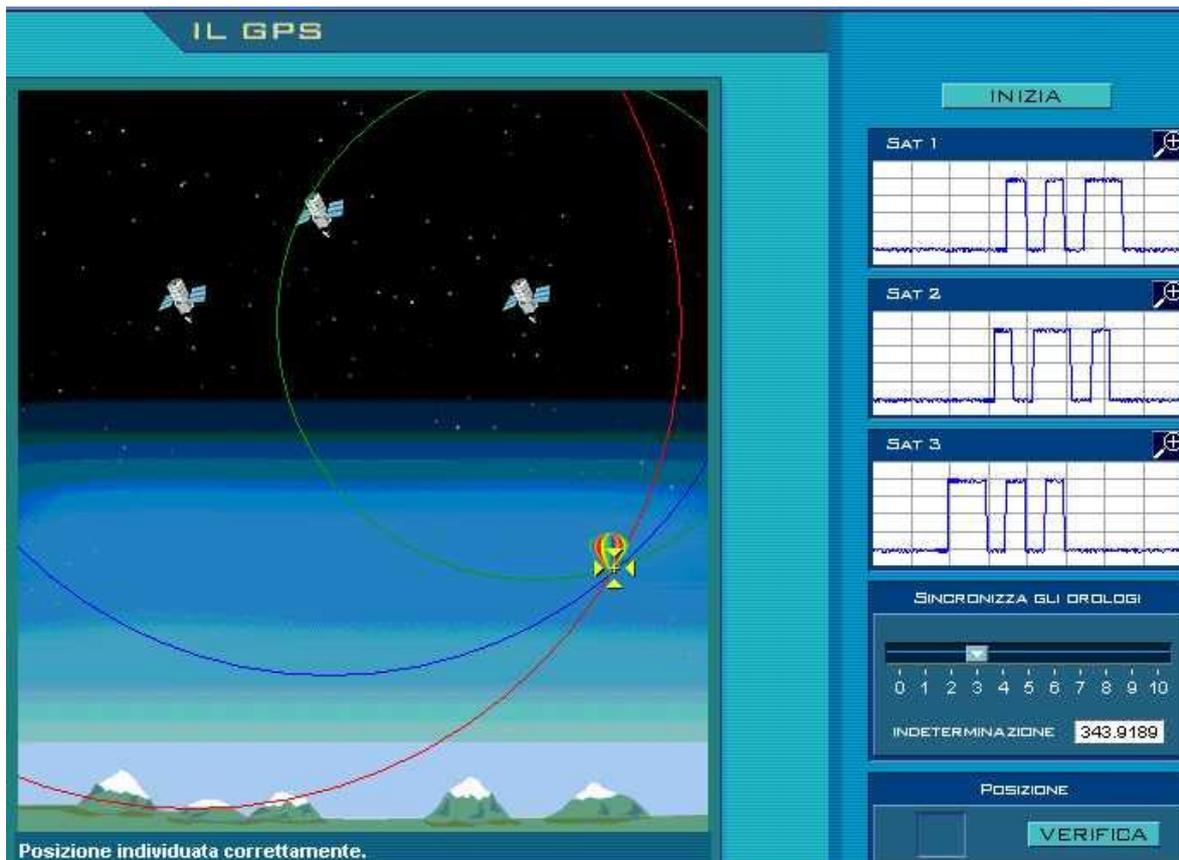


Vediamo ora un'applicazione tecnologica del tempo relativistico ai sistemi di posizionamento globale (*GPS*).

Il sistema di posizionamento globale GPS.

Il sistema GPS localizza un oggetto mobile sulla superficie della Terra (o nell'atmosfera) mediante i segnali radio comandati da **orologi atomici** emessi da una schiera di 24 satelliti posti a una quota di 16000 Km. Il mobile è dotato di un orologio che viene sincronizzato con quattro satelliti del sistema: esso è perciò localizzato all'intersezione di quattro superfici sferiche centrate sui satelliti. A rigore, basterebbero tre sfere, ma l'orologio sul mobile è di solito di gran lunga meno preciso degli orologi atomici, esso perciò è regolato sui segnali dei satelliti per rendere praticamente puntiforme l'intersezione.

L'immagine sottostante, tratta dall'Enciclopedia multimediale di "Le Scienze", marzo 2005, simula la localizzazione di un aerostato nell'ipotesi semplificata che esso sia situato in un piano verticale insieme a tre satelliti. In tal caso le quattro sfere sono sostituite da tre circonferenze.



Il **Sistema di Posizionamento Globale (GPS)** richiede due correzioni relativistiche per una corretta determinazione della posizione a Terra: una dovuta alla velocità dei satelliti rispetto alla Terra, la seconda dovuta alla minore gravità alla quota dei satelliti (Red Shift gravitazionale).

Effetto di velocità.

I satelliti del sistema GPS orbitano a poco più di 16000Km, perciò la loro distanza dal centro della Terra è $r = 22500 \text{ Km} = 3,515R$. (R è il raggio della Terra).

La loro velocità si ricava dalla formula

$$\frac{v^2}{r} = \frac{GM(Terra)}{r^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{r}} = \sqrt{\frac{gR^2}{r}}$$

e perciò

$$v = \sqrt{\frac{gR^2}{3,515R}} \cong 4 \text{ km/s}$$

L'effetto velocità provoca sul satellite un ritardo giornaliero pari a

$$\Delta t_1 = 86400 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{4}{3 \cdot 10^8}\right)^2}} - 1 \right)$$

e approssimando la radice a denominatore (il radicando è quasi 1) si ottiene

$$\Delta t_1 \cong 86400 \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{16}{9} \cdot 10^{-10} \right) \cong 7,7 \cdot 10^{-6} s \cong 7,7 \mu s$$

Red shift gravitazionale.

La frequenza ν' sul satellite, rispetto a quella ν a Terra, è

$$\frac{\nu'}{\nu} = \sqrt{\frac{1 - \frac{2GM}{Rc^2}}{1 - \frac{2GM}{dc^2}}} = \sqrt{\frac{1 - \frac{2gR^2}{Rc^2}}{1 - \frac{2gR^2}{3.515Rc^2}}}$$

che, dato il piccolo valore delle frazioni contenenti la c , si approssima con

$$\frac{\nu'}{\nu} \approx (1 - gR/c^2) \cdot (1 + gR/3.515c^2) \approx$$

$$\approx 1 - gR/c^2 (1 - 1/3.51) \approx 1 - 4.99 \cdot 10^{-10}.$$

Tale red shift provoca sul satellite un anticipo giornaliero pari a

$$\Delta t_2 = 86400 \cdot 4,99 \cdot 10^{-10} \approx 43 \mu s.$$

Sul satellite si ha, perciò, un anticipo totale $\Delta t = 43-8 = 35 \mu s$.

L'errore sulla posizione a Terra sarebbe pertanto di circa 11 Km al giorno ($c\Delta t$), se non si effettuassero le correzioni relativistiche.

Sviluppi successivi.

Prigogine e l'irreversibilità del tempo.

Il chimico belga dà molta importanza ai sistemi dissipativi e alla diminuzione locale di entropia nei sistemi aperti, ma tale diminuzione è temporanea e in ogni caso più che compensata dall'aumento di entropia dell'ambiente.

Caos deterministico e sistemi complessi esibiscono l'irreversibilità, ma ciò è spiegabile in termini statistici.

Il tempo quantistico.

Le leggi della meccanica quantistica, sia nella versione non relativistica (equazioni stazionaria e temporale di Schrodinger della funzione d'onda), sia in quella relativistica (equazione di Dirac per l'elettrone) sono basate su equazioni differenziali invarianti rispetto all'inversione temporale. E' per questo che Feynman spiega il positrone come un elettrone ordinario che viaggia all'indietro nel tempo.

Però, quando si esegue una misurazione, la funzione d'onda collassa e questo è un processo irreversibile. Si può però obiettare che il processo di misura è un'interazione tra un oggetto quantistico (elettrone, fotone,...) e un oggetto classico (lo strumento di misura) e questo è un sistema complesso (camera a bolle, lastra fotografica, computer, cervello) formato da una miriade di oggetti quantistici, per cui ancora una volta l'irreversibilità del tempo può essere spiegata in termini statistici.

Bibliografia ulteriore.

A questa bibliografia ulteriore si rinvia anche per una prima informazione sull'evoluzione del concetto di tempo in fisica quantistica e sull'ipotetica possibilità che tempo e spazio non siano continui, ma abbiano una struttura discreta, quantizzata, come la materia e l'energia.

- 1) Albert Einstein: "Relatività, esposizione divulgativa", Bollati Boringhieri, 1967, ristampa 2004. con una bella appendice di scritti classici di Descartes, Newton, Lobacevskij, Riemann, Helmholtz, Maxwell, Poincaré, Einstein stesso su spazio, tempo, geometria, materia, fisica. Prima edizione in tedesco del 1916, prima edizione italiana del 1921, Zanichelli.
- 2) Bertrand Russell, "L'ABC della relatività", 1^a edizione inglese del 1925, 1^a edizione italiana Longanesi 1964, ultima edizione 2005 con prefazione di Piergiorgio Odifredi.
- 3) Margherita Hack, Battaglia e Buccheri: "L'idea del tempo", UTET 2005. In particolare, per la concezione di Prigogine sull'irreversibilità del tempo, si vedano i cap. 8 e 9 di Buccheri. Si veda anche l'articolo dello scrivente, "Entropia e freccia del tempo", sul *Il Foglio*, giugno 2003.
- 4) Stephen Hawking: "Dal Big Bang ai Buchi Neri" (breve storia del tempo), B.U.R. 1990. Magistrale la sua esposizione sulle frecce del tempo: psicologica, termodinamica, cosmologica.
- 5) AA. VV., "Dal big bang alle galassie", collana "Frontiere" di *Le Scienze*, giugno 2005. Esemplare per chiarezza e semplicità espositiva l'articolo di Lee Smolin sullo spazio e il tempo quantizzati. Per capire da dove spuntano fuori gli "atomi" di lunghezza e di tempo, detti lunghezza e tempo di Plank,, si veda:
- 6) John Barrow, "I numeri dell'universo", Mondadori 2004.
- 7) AA.VV., "Le Scienze" novembre 2004, dedicato al centenario della Relatività: L'eredità di Einstein. Tratta non solo di Relatività, ma anche dei decisivi contributi di Einstein alla nascente meccanica quantistica.
- 8) Sergio Bercia, "I grandi della scienza: Einstein", Edizione Le Scienze 1998, Anno I, N°6. Quanti e relatività: una svolta nella fisica. La vita e l'opera del sommo scienziato e le relazioni con gli altri grandi fisici del XX° secolo.
- 9) Le Scienze Quaderni, "Spazio, tempo e Relatività", a cura di Fernando de Felice, ristampa 2000.
- 10) Abraham Pais: "Einstein", la scienza e la vita di Albert Einstein, 1986 Bollati Boringhieri. E' la più completa biografia del grande fisico scritta da un allievo e amico.

*** Già docente nel Liceo Scientifico "Scorza" di Cosenza**